УДК 621.433.002

**БОНДИН Ю.Н.,** Научно-производственный комплекс газотурбостроения, г. Николаев

# УСКОРЕНИЕ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ НОВОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОУЗЛОВОЙ

У статті розглядається метод прискорення процесу створення нового газотурбінного двигуна за допомогою повузлової проводки. Обґрунтовується, що повузлова проводка є потужним засобом прискорення і зниження вартості та модернізації газотурбінної техніки.

The method of acceleration of process of creation of a new gas turbine engine by unit laying is examined in the article. It is grounded, that the unit laying is the powerful mean of acceleration and decline of cost and modernization gas-turbine technique.

## Постановка проблемы и выделение нерешенных задач

При проектировании сложного механизма (объекта), каким является газотурбинная установка, практически невозможно оптимизировать все технические решения, тем более что новый объект всегда содержит новые элементы или связи, не апробированные эксплуатацией. Кроме того, производство нового сложного объекта требует отработки новых и модернизации существующих технологий применительно к новым требованиям. Поэтому неизбежен процесс опытных и опытно-промышленных испытаний объекта (иногда достаточно продолжительных) вначале на заводском испытательном стенда, а затем в опытной эксплуатации. Ели какие-либо узлы новой установки вышли из строя, либо в процессе испытаний появились данные об их не оптимальности, испытания приходится повторять, что требует больших затрат времени и средств. В середине пятидесятых годов в авиационной промышленности считалось необходимым изготовить и испытать до поломки (или выработки ресурса) 20 – 25 экземпляров опытных двигателей данного проекта, прежде чем передавать двигатель в серийное производство.

## Изложение основного материла

Существенного снижения затрат времени и средств на доводку нового или модернизируемого двигателя можно добиться широко используя поузловой метод доводки, иногда называемый опережающим экспериментом. Сущность метода проста: еще на стадии проектирования все элементы, конструкция которых не моет быть обоснована надежными методами расчета, задолго до сборки первого двигателя проходят испытания на специальных лабораторных или натурных стендах для проверки функционирования, работоспособности, прочности, эффективности и надежности. Поэтому к моменту испытаний первого опытного двигателя большинство узлов и деталей, в работоспособности которых были сомнения, уже прошли испытания и в их конструкцию были внесены необходимые изменения. После изготовления первого образца натурного двигателя любой его элемент, вышедший из строя во время испытаний, проходит специальные дополнительные исследования на стендах с целью установления причин выхода из строя и проверки правильности проведенных последующих мероприятий по устранению дефекта.

Метод позволяет существенно сократить сроки проектирования двигателя, снизить стоимость доводочных работ и повысить надежность установки. Однако применение метода поузловой доводки требует развитой инфраструктуры предприятия, наличия большого количества универсальных (перенастраиваемых) испытательных стендов, высококвалифицированного исследовательского персонала и мощной современной приборной базы.

Затраты на исследования могут быть существенно сокращены, если создавать не узкоспециализированные стенды для испытаний

каждой детали (узла), а высокомобильные универсальные стенды, на которых при использовании индивидуальных присоединительных устройств (переходников) можно испытывать большое число разнотипных деталей одного назначения. Например, наличие достаточно мощного и широкополосного электродинамического вибратора позволяет создать универсальный экспериментальный стенд для исследования прочности турбинных и компрессорных лопаток. Кроме стандартного определения собственных частот и усталостной прочности пера лопатки на этом стенде могут проводиться исследования замковых соединений лопаток, колебаний высших форм и определение зон максимальных напряжений при различных формах колебаний, что существенно уменьшает необходимое количество тензорезисторов при натурном тензометрировании. На этом же стенде может быть своевременно оценено влияние на прочность лопаток не только изменение материала, но и изменение технологии изготовления (например, переход от электрохимической обработки пера к точечному фрезерованию или введение дробеструйной обработки галтелей и замка).

Если дополнить вибростенд простейшей голографической установкой, то можно существенно расширить возможности исследований в области высших форм колебаний лопаток.

Важным преимуществом большинства экспериментальных стендов является возможность создания экстремальных (запредельных) нагрузок, что, во-первых, позволяет обнаружить слабое звено в испытуемом объекте, а, во-вторых, существенно сокращает время большинства прочностных испытаний.

Классическим примером экспериментального стенда для поузловой доводки является стенд для испытания зубчатых передач. В основу стенда положена идея, что две аналогичные передачи, установленные “спиной к спине” и соединенные соответственно входными и выходными валами, представляют замкнутый контур с циркуляцией мощности. Если два любых вала (входных или выходных) развернуть один относительно другого на определенный угол, то ко всем зацеплениям будет приложена нагрузка, пропорциональная углу разворота. Если после приложения нагрузки привести систему во вращение, то одна из передач будет работать в режиме редуктора (что и необходимо было получить) а вторая – в режиме мультипликатора (нагрузка приложена к рабочим сторонам зуба, но вращение происходит в обратном направлении), что дает дополнительный материал по прочности и усталости зубьев. В НПКГ разработан (и защищен патентами) ряд гидравлических, зубчатых и волновых нагружающих устройств, обеспечивающих различные нагрузки и углы разворота, что позволило спроектировать и изготовит несколько уникальных редукторных стендов. На этих стендах были проведены многочисленные исследовательские и сдаточные испытания не только корабельных редукторов с цилиндрическими переборными и планетарными передачами мощностью до 18000 л.с. на полных и запредельных нагрузках, но и сложных угловых редукторных систем для кораблей и судов на подводных крыльях и воздушной подушке.

Прямой экономический эффект от использования стендов замкнутого контура очень велик, поскольку при циркуляции мощности в замкнутом контуре затраты энергии необходимы только на компенсацию неизбежных потерь в контуре и обычно не превышают 10% циркулирующей мощности. Так, при длительных испытаниях корабельного редуктора мощностью 15000 л.с. на стенде замкнутого контура затраты энергии не превышали 400 кВт, что обеспечило экономию более 1 млн. грн только на топливе по сравнению в приводом редуктора от штатной газовой турбины.

Замкнутые редукторные стенды позволяют исследовать натурные зубчатые зацепления задолго до окончания проектирования редуктора, что гарантирует высокое качество проекта и обнаружение неоптимальных решений еще на стадии эскизного и технического проектов. Так было при создании уникального (единственного в мире) углового корабельного редуктора большой мощности с углом скрещивания осей 15 градусов. До принятия решения об основных параметрах используемого в редукторе уникального эвольвентно-конического зацепления, разработанного по нашему заказу проф. В.И. Безруковым из Челябинского политехнического института, опытные шестерни прошли на упрощенных редукторных стендах полный цикл испытаний на заедание, контактную и изломную прочность при различных нагрузках и условиях смазки.

Впоследствии, когда по технологическим причинам произошло несколько поломок зубьев, на тех же стендах были испытаны различные образцы изготовленных зацеплений, которые не только помогли дать рекомендации по улучшению конкретного технологического процесса, но и дали возможность разработать принципиально новую методику расчета технологического процесса изготовления зубьев переменной толщины и зубьев с ограниченным пятном контакта.

Не меньший интерес представляет стенд для испытания соединительных и демпфирующих муфт. Сложные корабельные всережимные газотурбинные установки количественного регулирования имеют в своем составе две или несколько газотурбинных двигателей, которые должны подключаться (и

отключаться) от общего гребного вала на ходу при любых нагрузках и оборотах гребного винта. Для целей подключения и отключения создаются специальные соединительные и обгонные муфты, а избыточная энергия удара при неизбежной разности оборотов валов поглощается демпфирующими муфтами.

Стенд замкнутого контура для исследований и испытаний муфт представляет два большие маховые массы (маховики), которые имитируют инерционные моменты гребного вала с подключенными механизмами и подсоединяемой турбины. Маховики снабжены автономными двигателями для раскрутки в любую сторону и технологическими тормозами для ускоренной остановки. Испытуемая муфта устанавливается между маховиками и включается при заданных оборотах и заданной разности оборотов. Установленные на валах датчики оборотов (угловых скоростей) и тензорезисторы для определения крутящего момента позволяют получить объективную картину нагрузок в момент включения. Высокая частота включений стенда (5…10 включений в час) позволяет сравнительно быстро выполнить паспортное число включений и оценить надежность конструкции.

Достаточно просто на стендах могут быть исследованы прочностные характеристики турбинных лопаток. Вал стенда приводится от паровой или воздушной высокооборотной турбины, для уменьшения потерь при испытании лопаточных аппаратов испытательная камера вакуумируется, при необходимости производится подогрев до заданной температуры индукционным или радиационным способом. Обороты повышаются до разрушения или установка работает на заданных оборотах определенное время (исследование ползучести). На той же установке с успехом проверяется прочность и ползучесть турбинных дисков, при этом в лопаточные пазы вставляются дополнительные массы (грузы), имеющие хвостовики (замки) лопаток. Установка позволяет оптимизировать форму полотна диска до проектирования турбины.

Метод поузловой доводки может быть использован и для таких конструкций со сложно моделируемыми процессами как камеры сгорания. Обычно камера сгорания газотурбинного двигателя включает 8…20 идентичных жаровых труб. Установив на испытательном стенде одну жаровую трубу можно сократить потребление воздуха для испытаний более чем в 10 раз и (главное) не ждать изготовления не только первого опытного образца двигателя, но и даже первого комплекта жаровых труб. А одну трубу можно изготовить практически без специальной оснастки только с универсальными приспособлениями. Это будет в несколько раз дороже, чем изготовление серийной жаровой трубы, но много быстрее, чем ждать изготовления оснастки и дешевле, если придется вносить крупные изменения и делать новый комплект технологической оснастки.

Обеспечение этого стенда воздухом необходимых параметров по расходу и давлению представляет достаточно сложную инженерную задачу, но она во много раз проще изготовления опытного двигателя. Поэтому большинство камер сгорания испытываются на модельных параметрах. Моделирование условий и объектов испытании при поузловой доводке является темой отдельного исследования.

Метод поузловой доводки (опережающего эксперимента) продемонстрировал свои преимущества при создании газопаротурбинной установки по монарной тепловой схеме “Водолей”.

При проектировании ГТУ “Водолей” встала задача создания принципиально новой технической конструкции – контактного конденсатора, для которого не существовало отечественных или зарубежных аналогов. Методики расчета контактных конденсаторов также не существовало, поскольку процесс тепломассообмена при встречном движении смеси выхлопных газов и перегретого водяного пара и охлаждающей жидкости в капельно-дисперсном состоянии теоретически и экспериментально не был изучен. Поэтому было принято решение интенсифицировать прикладные экспериментальные исследования, то есть испытывать на упрощенной установке предполагаемые элементы контактного конденсатора. Поскольку практически отсутствовали критерии моделирования испытания проводились с натурными параметрами и при натурных размерах элементов конструкций, но сам элемент брался минимальным по поперечному сечению. В частности, на первом экспериментальном стенде исследовался элемент проточной части поперечным сечением 100х100 мм при предполагаемом поперечном сечении натурного контактного конденсатора в несколько квадратных метров. Выбор малого сечения определялся простотой и доступностью вспомогательных устройств по подаче и подогреву воздуха и воды. Безусловно, близкое расположение ограждающих конструкций (стенок) вносило свои изменения в происходящие процессы, однако, для первого приближения (работает или не работает устройство в принципе) этими отклонениями пренебрегли в пользу сокращения сроков получения первых результатов.

Первые же достаточно быстро проведенные эксперименты позволили определить гидравлические сопротивления для расчета натурной проточной части конденсатора и всей установки в целом, но главное, были получены ответы на принципиальные вопросы: где и как происходит основной теплообмен, как приблизительно должны выглядеть основные

элементы контактного конденсатора, сколько ориентировочно необходимо охлаждающей воды и какие ограничения накладываются на ее расход, что происходит при избыточных количествах охлаждающей воды, какие из предложенных конструктивных решений очевидно тупиковые.

Так, еще при изготовлении экспериментального стенда было выяснено, что предложенная конструкция сетчатых трубок диаметром 10 мм, хотя и имеет определенные теплотехнические преимущества (которые подтвердились в процессе последующих экспериментов), настолько трудоемки в производстве и требуют сложных крепежных конструкций, что они были заменены еще на стадии эскизного проекта на менее эффективные теплотехнически, но намного более технологичные вертикальные пакеты из обычной сетки с выштампованными гофрами для автоматического поддержания постоянного расстояния между соседними сетками. Не подтвердилось и другое предлагавшееся конструктивное решение – хаотическое заполнение пространства конденсатора проволочно-стружечными элементами малого сечения. Суммарная поверхность этих элементов оказалась недостаточной для обеспечения заданного теплообмена газопаровой смеси с охлаждающей водой, а гидравлическое сопротивление значительно выше сетчатого пакета с регулярной (организованной) структурой.

Одновременно был решен ряд специфических задач, связанных с проведением эксперимента. Были определены основные критерии эффективности конденсатора, по которым необходимо было оптимизировать установку, решены вопросы измерения скорости потока при загромождении сечения, определения влагосодержания в различных точках по пути движения потока, определения температуры в горячем потоке с капельно-дисперсным состоянием влаги и другие. Следует отметить, что стенд имел специальные окна на боковых поверхностях ограждений потока, что позволяло визуально наблюдать происходящие процессы и значительно облегчило обнаружение и качественное изучение переходных процессов. Так было обнаружено, что при определенных соотношениях количества подаваемой охлаждающей воды и движущейся ей навстречу газопаровой смеси наступает момент, когда вода не умещается на проволоке сетки и начинает заполнять межсеточные промежутки. Это характеризуется периодическими выбросами воды из межсеточных пространств (то есть потерей воды с отходящими газами, и увеличением сопротивления газопаровому потоку, что снижает экономическую эффективность всей установки. Дальнейшее увеличение подачи воды приводило к полному заполнению межсеточных пространств, стремительному росту сопротивлений и уносу больших количеств воды с газами.

Для уточнения полученных результатов и дополнительных исследований был изготовлен стенд с сечением проточной части 270х270 мм. Поскольку на первом стенде было определено, что основной теплообмен происходит на сетках насадки, то есть на твердой поверхности, покрытой водой и обтекаемой потоком газа, а не при обтекании газом летящей навстречу капли, то на втором стенде уже исследовались различные конструкции насадок, расстояния от насадок до водяных форсунок системы орошения, процесс переноса и улавливания капель из потока.

Была в принципе отработана конструкция жалюзийного сепаратора на выходе из конденсатора для улавливания мелкодисперсных капель охлаждающей воды, которые при ограниченных скоростях истечения из форсунок и малых массах, отнесенных к поперечному сечению капли, подхватывались охлажденным потоком газа и уносились из конденсатора. Была отработана геометрия и расположение орошающих форсунок, обеспечившие наиболее приемлемые равномерность распределения воды по поперечному сечению газохода и дисперсность распыла (при экономически допустимой трудоемкости изготовления форсунок).

Следующий экспериментальный стенд имел поперечное сечение газопарового потока 1000х1000 мм и предназначался для испытания и доводки готовых элементов конденсатора. Одновременно на этом стенде были проведены натурные испытания самого маленького двигателя научно-производственного комплекса – газотурбогенератора ГТГ-100К мощностью 100 кВт. Целью испытаний была натурная проверка реальности работы контактного конденсатора. Охлаждающая вода вместе с конденсатом, осажденным из газопаровой смеси, охлаждалась в стандартных трубчатых холодильниках технической водой и снова подавалась в контактный конденсатор. В процессе эксперимента количество конденсата непрерывно увеличивалось, что было зафиксировано прямыми измерениями уровня в сливном баке. Тем самым прямым экспериментом было доказано, что контактный конденсатор не только полностью улавливает пар из газопаровой смеси, но и водяной пар, образовавшийся в процессе окисления углеводородного топлива.

В дальнейшем этот стенд позволил провести уникальное натурное исследование по загрязнению конденсата кислотами, образовавшимися при окислении вредных примесей, содержащихся в топливе. Эти исследования показали, что опасения, связанные с загрязнением конденсата, существенно преувеличены, и нет необходимости проектировать специальную систему водоподготовки. Опыт показал (и практика в дальнейшем это подтвердила), что вполне можно обойтись стандартными средствами поддержания

работоспособности конденсата.

К моменту создания первого опытного образца контактного конденсатора для натурной установки подавляющее количество неясных и спорных вопросов было решено, что позволило с первого раза изготовить образец принципиально нового конденсатора, который без больших проблем успешно эксплуатируется более 7 лет.

**Выводы**

Поузловая доводка (опережающий эксперимент) является мощным средством ускорения и удешевления создания и модернизации газотурбинной техники. Необходимо только, чтобы расчетчики и конструкторы двигателя смогли четко

***Література***

1. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей, изд. 3, М., “Машиностроение”, 1984.